

茜草对丝织品稳定同位素的影响

韩丽华^{1a}, 彭志勤^{1b}, 杨丽萍^{1a}, 周 旻², 胡智文^{1b}, 万军民^{1b}

(1. 浙江理工大学 a. 材料与纺织学院、丝绸学院; b. 先进纺织材料与制备技术教育部重点实验室 杭州 310018;

2. 中国丝绸博物馆 杭州 310002)

摘要: 将稳定同位素技术应用到古代丝织品溯源的研究正受到极大的关注,其中染色对丝织品同位素的影响是非常重要的研究内容之一。利用中国多产地来源的茜草对空白丝织品进行染色处理,通过对茜草根、提取液及上染后的丝织品进行氧、氢、碳和锶同位素相关检测分析,研究茜草对丝织品中稳定同位素的影响。结果显示:上染后丝织品氢、氧同位素的比值均有所提高;染色丝织品⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值的变化遵循一定规律,与对应染色茜草的值相关;另外,染色丝织品中锶的含量均高于对照组。研究结果表明:染色对丝织品稳定同位素值有显著影响,可以选择其中影响有规律的同位素进行溯源研究,并根据影响规律有针对性地进行干扰因素的排除。

关键词: 茜草; 染色; 丝织品; 稳定同位素; 锶

中图分类号: TS193.844 文献标志码: A 文章编号: 1001-7003(2018)08-0001-06 引用页码: 081101

Pilot study on the effect of madder on the stable isotopes of silk fabrics

HAN Lihua^{1a}, PENG Zhiqin^{1b}, YANG Liping^{1a}, ZHOU Yang², HU Zhiwen^{1b}, WAN Junmin^{1b}

(1a. Silk Institute, College of Materials and Textiles; 1b. Key Laboratory of Advanced Textile Materials and Manufacturing Technology, Ministry of Education, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. China National Silk Museum, Hangzhou 310002, China)

Abstract: The use of stable isotope techniques in tracing the provenance of ancient textiles has received increasing attention recently. The effect of dyeing on the isotopes of textiles is one of important subjects among the studies. Madder with productively source in China was used to dye silk fabrics. The effect of madder on the stable isotopes of silk fabrics was studied through detecting oxygen, hydrogen, carbon and strontium isotopes of madder root, extract solution and silk fabrics dyed. The results show that the specific value of hydrogen and oxygen isotopes improves after dyeing. The changes in ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr values of dyed silk fabrics follow certain rules, and are related to the values of corresponding dyeing madder. Besides, strontium content in dyed silk fabrics is higher than that of control group. The result indicates that dyeing has significant influence on stable isotope of silk fabrics. The isotopes with certain influencing rules can be chosen to trace the provenance of ancient textiles. And, interference factors can be eliminated according to the influencing rules.

Key words: madder; dyeing; silk fabrics; stable isotope; strontium

丝绸之路是一座贯穿东西方文明的桥梁,带来不同区域艺术的相互交融^[1],通过这条贯穿亚欧的大道,中国的丝、绸、绫、缎、绢等丝织品,源源不断地

西输。在丝绸之路上出土了大量纺织品文物,由于纺织品种类繁多、数量丰富,识别古代纺织品的产地比较困难。利用同位素溯源技术,一方面可以将产品、产地建立关系;另一方面能区别不同种类及来源的生物产品,且又为判断地域来源提供相对有效的方法。尤其是稳定同位素技术研究所需样品量少,在考古领域的应用属于科技考古的重要部分,也是当前考古学的研究前沿与热点^[2-8]。

收稿日期: 2017-10-13; 修回日期: 2018-06-01

基金项目: 浙江省文物保护专项项目(2015011)

作者简介: 韩丽华(1989-),女,硕士研究生,研究方向为丝织品产地溯源。通信作者: 彭志勤,副教授, pengqiao6858@126.com。

早些年,虽然没有具体的关于同位素研究方法、内容,有学者分析了利用氢氧稳定同位素技术进行“都灵裹尸布”(亚麻材质)溯源的可能性^[9]。Karin Margarita Frei等^[10]分析了现代羊毛里的锶同位素比值,认为利用锶同位素开展羊毛织物产地溯源具有可行性。他们还对丹麦 Huldremose 两个泥炭沼泽地出土的铁器时代羊毛和植物纤维织物进行了溯源研究^[11]。2014年 Regina Knaller等^[12]检测了法门寺出土唐代丝绸文物的氢、碳、氮和氧稳定同位素的相对比例,发现这些文物的数据不同,因此认为所测丝绸文物或蚕茧来自不同产地。该报道仍以利用稳定同位素开展丝绸文物溯源可能性的分析为主,没有具体研究方法和结果的客观分析。吴曼琳等^[13]分析了诸多利用该技术进行纺织品溯源研究有许多局限性和不确定性,指出染色是纺织品制造的一个重要环节,染料会对纺织品中原始同位素等的比例产生影响,从而对检测结果产生干扰,因此利用同位素溯源研究时需将天然染料从被染过色的纺织品中去除。

植物染料是中国古代用于丝织品染色的主要原料^[14],其中,红色系植物染料的主要来源是茜草根^[15]。茜草属于多年生草木植物^[16-17],生长环境比较随意,中国大部分地区均有分布^[18],其化学组分主要为蒽醌衍生物^[19-22],蒽醌环上有一OH、—COOH、—CH₃,含量不同的基团、位点,使茜草品种多样化。为了解植物染料对丝织品稳定同位素的影响,以茜草为例,选取分别来自中国五个省的茜草根,为了实现染料对样品干扰最小的原则,直接采取水浸渍提取法提取茜草色素^[23-25],之后用直接上染的方法对空白丝绸进行染色^[26-28],最后检测所有样品的稳定同位素值^[29],初步探讨植物染料茜草对丝织品氢、氧、碳、锶同位素值的影响,以期利用同位素技术开展丝织品文物溯源提供一定依据^[30]。

1 试验

1.1 材料和仪器

真丝电力纺、茜草根(市售),无水乙醇(分析纯,杭州高晶精细化工有限公司),氢氧化钠(分析纯,杭州高晶精细化工有限公司)。

Delta V Advantage 型稳定同位素质谱仪、Flash 2000 HT 型元素分析仪(Thermo Scientific, USA), PHOENIX 型热表面电离质谱仪(PHOENIX, German), FD-1A-50 型冷冻干燥机(北京博医康实验仪

器有限公司), DUG-9240A 型电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司), HH-2 型数显恒温水浴锅(常州普天仪器制造有限公司)。

1.2 方法

1.2.1 丝织品的染色

用去离子水洗净 50 g 茜草根,然后放在桶中清水浸泡 24 h,之后将浸泡溶解于水中的茜草中的黄色素倒出,再以去离子水冲洗茜草根并放在紫砂炖锅中按照料液比 1:40、温度 100 ℃、时间 40 min 的条件三次提取茜草色素,提取的染液过滤并混合均匀,取出 50 mL 冷冻干燥处理后待测。待染的丝织品浸泡于无水乙醇中 10 min,之后用去离子水清洗晾干,按浴比 1:50 放入染浴中升温染色,染浴温度至 90 ℃后煮染 0.5 h。取出丝织品,放于约 40 ℃温水中清洗,然后用常温去离子水洗涤,最后晾干。试验中所用的茜草根及相应的上染丝织品如图 1 所示。由图 1 可以看出,茜草根由于不同产地,其大小、外观、相应染色丝织品的颜色均有所不同。为了使干扰因素尽可能减小,染色时未加媒染剂和助染剂,因此上染的颜色较浅,相对偏黄色调。

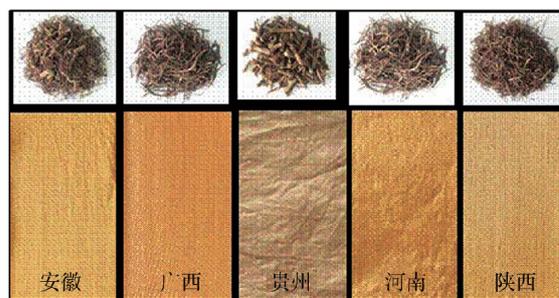


图1 各地茜草根及上染后丝绸样品

Fig. 1 The samples of madder roots in different places and dyed silk

1.2.2 稳定同位素比值的检测

检测前,对所有样品进行预处理。清洗后晾干的茜草根样品以粉碎机粉碎并混合均匀,取适量置于离心管中等待检测。取冷冻干燥后的染液及提取茜草色素所用的去离子水适量,置于离心管中,冷藏保存。染色丝织品和对照丝织品也粉碎处理并混合均匀,取适量于离心管中待测。

轻稳定同位素分析:所有样品的氢、氧、碳同位素检测分析均采用 Flash 2000 HT 元素分析仪和 Delta V Advantage 稳定同位素质谱仪联用设备(TC/EA-IRMS)进行。另外,至少选用两种国际通用相关同位素标样(IAEA),利用两点校正法,对样品的测试结

果进行校正。为保证结果的准确性,一般测试过程中每隔 12 个样品插入 1 个标准样,每个样品重复测 3 次取平均值。数据按下式进行计算:

$$\delta_{\text{样品}}/\text{‰} = \frac{R_{\text{样品}} - R_{\text{标准}}}{R_{\text{标准}}} \times 1000 \quad (1)$$

式中: R 表示某种元素的重同位素丰度和轻同位素丰度之比,例如 $^2\text{H}/^1\text{H}$ 、 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 、 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, δ 表示样品与标准品之间同位素比值的相对偏差。

锶同位素测量:采用静态多接收方式测量,先在样品中加入 ^{84}Sr 稀释剂进行灰化消解,再加入一定浓度的盐酸离心分离,接着在分离柱中用不同浓度的盐酸淋洗,使铷、锶总 REE 分离,之后对锶

同位素进行点样,最后进行 TIMS 测量。测试在核工业北京地质研究院 PHOENIX 热电离质谱仪上完成。

锶同位素比值测定过程中的分馏效应采用 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.375209$ 进行正规化校正,样品中锶含量,通过样品量及加入的稀释剂量计算得到。

2 结果与分析

2.1 轻稳定同位素分析

表 1 为茜草根、提取液及染色丝绸样品的轻稳定同位素值。

表 1 茜草根、提取液及上染后丝绸样品中轻稳定同位素值

Tab. 1 Isotope($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, and $\delta^{15}\text{N}$) results of madder root, extracts and dyed silk fabrics

编号	样品	地区	δ 值 / ‰		
			^2H	^{18}O	^{13}C
1	茜草根	安徽	-67.20 ± 1.31	21.05 ± 0.12	-28.70 ± 0.04
2		广西	-87.55 ± 1.26	19.10 ± 0.10	-27.70 ± 0.04
3		贵州	-70.42 ± 1.18	21.27 ± 0.13	-28.10 ± 0.04
4		河南	-66.58 ± 0.94	20.31 ± 0.38	-27.71 ± 0.12
5		陕西	-75.89 ± 0.87	20.06 ± 0.16	-26.37 ± 0.06
6	茜草提取液	安徽	-62.87 ± 0.22	16.40 ± 0.07	-28.18 ± 0.10
7		广西	-56.12 ± 0.16	20.49 ± 0.05	-28.17 ± 0.02
8		贵州	-51.72 ± 0.28	17.47 ± 0.09	-27.37 ± 0.09
9		河南	-50.70 ± 0.29	18.16 ± 0.01	-27.92 ± 0.05
10		陕西	-61.32 ± 0.13	17.71 ± 0.10	-27.08 ± 0.06
11	染后丝织品	安徽	-71.61 ± 0.61	19.23 ± 0.08	-26.15 ± 0.11
12		广西	-72.25 ± 0.83	22.92 ± 0.12	-26.21 ± 0.08
13		贵州	-70.58 ± 0.37	17.40 ± 0.06	-26.10 ± 0.04
14		河南	-72.80 ± 0.56	20.60 ± 0.08	-26.21 ± 0.13
15		陕西	-72.93 ± 0.38	19.23 ± 0.13	-26.20 ± 0.14
16	对照丝织品		-76.93 ± 0.31	16.41 ± 0.05	-26.15 ± 0.12
17	对照组水样		-44.63 ± 0.04	-7.50 ± 0.07	未测

从表 1 可以看出,茜草根中的 $\delta^2\text{H}$ 变化范围在 $-87.55\text{‰} \sim -66.58\text{‰}$,其中广西样品中 $\delta^2\text{H}$ 最低,河南样品最高,这与郭波莉等^[31]的研究距海较近的地方 $\delta^2\text{H}$ 越高的结论相反,也不完全满足海拔与 $\delta^2\text{H}$ 的关系,因为自然界中的氢同位素还受降雨量、温度、纬度等多种因素影响。茜草提取液中的 $\delta^2\text{H}$ ($-50.70\text{‰} \sim -62.87\text{‰}$) 明显高于当地茜草根及上染后丝织品样品中 $\delta^2\text{H}$ 值,其中安徽省茜草提取液中 $\delta^2\text{H}$ 最低为 -62.87‰ ,河南茜草提取液中 $\delta^2\text{H}$ 值最高为 -50.70‰ 。所有茜草提取液样品中 $\delta^2\text{H}$ 值比水样空白中氢同位素值 -44.63‰ 低。上染后丝织品中 $\delta^2\text{H}$ 比较稳定,变化范围在 $-72.93\text{‰} \sim$

-70.58‰ ,但都明显高于对照组样品中的 $\delta^2\text{H}$ 值 -76.93‰ 。

除广西样品外,茜草根的 $\delta^{18}\text{O}$ 值大都高于提取液的。茜草根中 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围在 $19.10\text{‰} \sim 21.27\text{‰}$ 。除了贵州样品外,染色丝织品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值基本都比茜草根提取液中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 ($16.40\text{‰} \sim 20.49\text{‰}$) 高。在所有样品中,广西茜草染色丝织品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值最高,其对应提取液的 $\delta^{18}\text{O}$ 值也最大 (20.49‰);河南提取液的 $\delta^{18}\text{O}$ 值仅次于广西样,其对应染色丝织品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值也仅次于广西样,说明茜草根提取液的氧同位素值与其对应染色丝织品的氧同位素值保持一致。茜草提取液的 $\delta^{18}\text{O}$ 值均大于

16.40‰,明显比空白水样的-7.50‰高。此外,染色丝织品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(17.40‰~22.92‰)均明显比对照样的(16.41‰)高。

各省茜草根的 $\delta^{13}\text{C}$ 值有明显差异,其中,安徽茜草样的 $\delta^{13}\text{C}$ 最低(-28.7‰),陕西样的最高(-26.37‰),广西与河南样的 $\delta^{13}\text{C}$ 值比较接近,相差仅0.01‰。提取液的 $\delta^{13}\text{C}$ 差异较小,在-28.18‰~-27.08‰范围波动。各地染色丝织品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值都明显比相应茜草提取液样的值高,但与对照丝织品的 $\delta^{13}\text{C}$ 相比差异较小,可以看出茜草对丝织品的 $\delta^{13}\text{C}$ 影响较小。

分析认为,发生以上变化的原因可能如下:茜草的有效成分主要为蒽醌类衍生物,在染色过程中,蒽醌环上的OH、COOH基团与丝纤维上的活性基团发生反应,从而引起染色丝织品的氢、氧同位素组成发生变化。而碳作为丝纤维的主要组成元素,受染色的影响很小。

2.2 锶同位素及含量分析

表2为茜草根、提取液及上染后丝绸样品中锶同位素组成。

表2 茜草根、提取液及染后丝绸样品中锶同位素组成

Tab.2 Sr isotopic compositions of madder root, extracts and dyed silk fabrics

编号	样品	地区	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\text{Sr}/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	Std(err/abs)
1		安徽	0.711 94	91.30	0.000 014
2		广西	0.710 18	55.13	0.000 013
3	茜草根	贵州	0.709 72	37.73	0.000 009
4		河南	0.711 64	28.89	0.000 011
5		陕西	0.711 44	105.55	0.000 014
6		安徽	0.711 57	0.24	0.000 009
7		广西	0.710 33	0.10	0.000 011
8	提取液	贵州	0.710 90	0.08	0.000 014
9		河南	0.711 43	0.07	0.000 014
10		陕西	0.711 38	0.21	0.000 014
11		安徽	0.711 46	4.62	0.000 011
12	染后丝	广西	0.710 52	2.13	0.000 013
13	织品	贵州	0.710 38	1.39	0.000 011
14		河南	0.711 19	2.65	0.000 013
15		陕西	0.711 28	5.40	0.000 008
16	对照丝织品		0.711 203	1.16	0.000 011
17	对照组水样		0.711 719	0.01	0.000 017

综合分析表2发现,上染后丝织品中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值与对应茜草根中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值有一定关系,安徽茜草根样品中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值是五组样品中最高,为0.711 94,

对应上染后丝织品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.711 46,也是最大值;贵州茜草根样品中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值是五组样品中最低,为0.709 72,对应上染后丝织品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.710 38,属于最小值。安徽和陕西茜草染色丝织品中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值高于对照组的0.711 20,说明安徽和陕西茜草染料对这种丝织品中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值富集程度高一些;广西及贵州茜草染色丝织品中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值低于对照组,说明广西和贵州的茜草染料对这种丝织品中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值富集程度低一些;与河南茜草染色丝织品中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(0.711 19)较为接近,说明河南茜草染色的影响较小。虽然提取液的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值均比对照组的0.711 72低,但提取液与茜草根和染色丝织品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值没有明显对应关系,可能与色素提取过程中最后所得五个样的滤出液难以控制一致有关。

茜草根的Sr含量地区差异明显,五个茜草根的Sr含量的平均值为63.72 $\mu\text{g}/\text{g}$,其中河南茜草根的Sr含量只有28.89 $\mu\text{g}/\text{g}$,而陕西茜草根的Sr含量高达105.55 $\mu\text{g}/\text{g}$ 。提取液的Sr含量与茜草根相比都偏低,在0.07~0.24 $\mu\text{g}/\text{g}$ 范围变化。染色丝织品的Sr含量与提取液的Sr含量呈现一定关系,其中安徽与陕西提取液样的Sr含量明显高于另外三省的,而这两个省份样品的染色丝织品Sr含量也高于另外三省样染色的。所有染色丝织品的Sr含量都比对照空白丝织品的Sr含量(1.16 $\mu\text{g}/\text{g}$)高,所有茜草提取液的Sr含量也都高于空白水样的Sr含量(0.01 $\mu\text{g}/\text{g}$)。

3 结 论

不同产地的茜草在形状、外观等方面差异大,其中的氢、氧、碳同位素特征值差异较大,这种差异性可以为后期利用同位素技术开展的丝织品溯源研究提供条件,有助于追溯织物所染茜草的来源。因茜草本身化学成分的原因,茜草对染色丝织品的氢和氧同位素比值有明显的影响,主要表现为其中的重同位素比标准物更为富集。植物染料茜草与对应染色丝织品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值存在一定对应关系。染色丝织品的Sr含量都比对照样高。遵循同位素混合效应,茜草染色对丝织品稳定同位素的特征值有明显影响,可以选择其中有规律影响的同位素开展溯源研究,并可以根据影响的大小针对性进行干扰因素的排除。

参考文献:

- [1]张少华. 试论丝绸之路的文化意义[J]. 理论观察, 2005 (6): 74-75.
ZHANG Shaohua. Review cultural significance of the silk road [J]. Theory Observe, 2005(6): 74-75.
- [2]尹若春,张居中. 锶同位素分析技术在考古学中的应用研究[J]. 东南文化, 2007(1): 55-60.
YIN Ruochun, ZHANG Juzhong. Study on application of strontium isotope analysis in archeology [J]. Southeast Culture, 2007(1): 55-60.
- [3]SHAW H, MONTGOMERY J, REDFERN R, et al. Identifying migrants in Roman London using lead and strontium stable isotopes [J]. Journal of Archaeological Science, 2016, 66 (3): 57-68.
- [4]VON CARNAP-BORNHEIM C, NOSCH M L, GRUPE G, et al. Stable strontium isotopic ratios from archaeological organic remains from the Thorsberg peat bog [J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2007, 21(9): 1541-1545.
- [5]KILLGROVE K, MONTGOMERY J. All roads lead to rome: exploring human migration to the eternal city through biochemistry of skeletons from two Imperial-Era Cemeteries (1st-3rd c AD) [J]. PloS One, 2016, 11(2): 1-30.
- [6]FREI K M. Exploring the potential of the strontium isotope tracing system in Denmark [J]. Danish Journal of Archaeology, 2013, 1(2): 113-122.
- [7]ISABELLA C C VON HOLSTEIN, PENELOPE WALTON ROGERS, OLIVER E CRAIG, et al. Provenancing archaeological wool textiles from medieval Northern Europe by light stable isotope analysis ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^2\text{H}$) [J]. PloS One, 2016, 11(10): 1-27.
- [8]FREI K M, BERGHE I V, FREI R, et al. Removal of natural organic dyes from wool-implications for ancient textile provenance studies [J]. Journal of Archaeological Science, 2010, 37(9): 2136-2145.
- [9]ROBERT H D, LARRY A S. Isotope measurements and provenance studies of the Shroud of Turin [J]. Archaeological Chemistry IV, 1989, 220: 409-417.
- [10]FREI K M, FREI R, MANNERING U, et al. Provenance of ancient textiles: a pilot study evaluating the strontium isotope system in wool [J]. Archaeometry, 2009, 51(2): 252-276.
- [11]FREI K M, SKALS I, GLEBA M, et al. The huldremose iron age textiles, denmark: an attempt to define their provenance applying the strontium isotope system [J]. Journal of Archaeological Science, 2009, 36(9): 1965-1971.
- [12]KNALLER R, STRÖBELE F. The heritage of Tang dynasty textiles from the famen temple, Shaanxi, China: technological and stable isotope studies [J]. Studies in Conservation, 2014, 59(S1): 62-65.
- [13]吴曼琳, 杨小明. 锶同位素溯源法在古代纺织品研究中的应用[J]. 丝绸, 2007, 54(5): 51-54.
WU Manlin, YANG Xiaoming. Application of strontium isotope tracing method in archaeological textile research [J]. Journal of Silk, 2007, 54(5): 51-54.
- [14]陈荣圻. 天然染料及其染色[J]. 染料与染色, 2015, 52(3): 1-11.
CHEN Rongqi. Natural dyes and applications thereof [J]. Dyestuffs and Coloration, 2015, 52(3): 1-11.
- [15]LAUREN FORD, ROBERT L HENDERSON, CHRISTOPHER M RAYNER, et al. Mild extraction methods using aqueous glucose solution for the analysis of natural dyes in textile artefacts dyed with dyer's madder (*Rubia tinctorum* L) [J]. Journal of Chromatography A, 2017, 53(1): 36-46.
- [16]李鹏, 胡正海. 茜草的生物学及化学成分与生物活性研究进展[J]. 中草药, 2013, 44(14): 2009-2014.
LI Peng, HU Zhenghai. Research progress in biology, chemical constituents, and biological activities of *Rubia cordifolia* [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2013, 44(14): 2009-2014.
- [17]侯秀良, 位丽, 张新龙, 等. 植物染料茜草的稳定性研究[J]. 毛纺科技, 2007(8): 24-27.
HOU Xiuliang, WEI Li, ZHANG Xinlong, et al. Study on stability of vegetable dyestuff madder [J]. Wool Textile Journal, 2007(8): 24-27.
- [18]孙云嵩. 茜草: 红色的植物染料[J]. 丝绸, 2001(11): 20-22.
SUN Yunsong. Madder: a red vegetable dye [J]. Journal of Silk, 2001(11): 20-22.
- [19]DIANA C RAMBALDI, FEDERICA POZZI, NOBUKO SHIBAYAMA, et al. Surface-enhanced raman spectroscopy of various madder species on wool fibers: the role of pseudopurpurin in the interpretation of the spectra [J]. Research Article, 2015(46): 1073-1081.
- [20]张琳, 彭亮, 胡本祥. 茜草的化学成分研究进展[J]. 现代中医药, 2008, 28(2): 52-54.
ZHANG Lin, PENG Liang, HU Benxiang. Advance on chemical components of madder [J]. Modern Traditional Chinese Medicine, 2008, 28(2): 52-54.
- [21]刘路, 王佳佳, 崔雪靖, 等. 茜草属植物化学成分研究进展[J]. 中国实验方剂学杂志, 2015, 21(17): 225-229.
LIU Lu, WANG Jiajia, CUI Xuejing, et al. Advance on chemical components of rubia genus [J]. China Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2015, 21(17): 225-229.
- [22]C CLEMENTI W N, A ROMANI, F CIBIN, et al. A

- spectrometric and chromatographic approach to the study of ageing of madder (*Rubia tinctorum* L) dyestuff on wool [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2007(596): 46-54.
- [23]陈秀芳,金隽,唐林. 真丝织物天然染料染色综述[J]. *丝绸*, 2014, 51(1): 31-36.
CHEN Xiufang, JIN Jun, TANG Lin. Dyeing of silk fabrics with natural dyes [J]. *Journal of Silk*, 2014, 51(1): 31-36.
- [24]MAHMOUD FEIZ H N. Dyeing and adsorption studies of madder (*rubia tinctorum*) on wool fabrics [J]. *Materials Science*, 2015, 21(1): 81-86.
- [25]徐锡环. 真丝绸天然染料印染[J]. *江苏丝绸*, 2006(4): 47-49.
XU Xihuan. Dyeing of silk with natural dyes [J]. *Journal of Jiangsu Silk*, 2006(4): 47-49.
- [26]MEHRPARVAR L, SAFAPOUR S, SADEGHI-KIAKHANI M, et al. A cleaner and eco-benign process for wool dyeing with madder, *Rubia tinctorum* L, root natural dye [J]. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2016, 13(11): 1-10.
- [27]KHOSTRO FARIZADEH M M, MOHAMMAD ESMAIEL YAZDANSHENAS, ABOSAEID RASHIDI R M A M. Extraction, identification and sorption studies of dyes from madder on wool [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 113(6): 3799-3808.
- [28]袁小红. 茜草植物染料提取工艺及染色性能研究[J]. *中原工学院学报*, 2011, 22(5): 45-48.
YUAN Xiaohong. The extraction process of madder dye and its dyeing properties [J]. *Journal of Zhongyuan University of Technology*, 2011, 22(5): 45-48.
- [29]李成,潘立刚,王纪华,等. 稳定同位素技术在农产品产地溯源中的应用研究进展[J]. *农产品质量与安全*, 2013(5): 53-59.
LI Cheng, PAN Ligang, WANG Jihua, et al. Advance on using stable isotope in the analysis of traceability of produce [J]. *Quality And Safety of Agro-Products*, 2013(5): 53-59.
- [30]韩丽华. 稳定同位素技术在桑蚕丝织溯源中的应用研究初探[D]. 杭州: 浙江理工大学 2018.
HAN Lihua. Pilot Study on Stable Isotope to Trace the Origin of Silk Fabrics [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2018.
- [31]郭波莉,魏益民, SIMON K D, 等. 稳定性氢同位素分析在牛肉产地溯源中的应用[J]. *分析化学*, 2009, 37(9): 1333-1336.
GUO Boli, WEI Yimin, SIMON K D, et al. Application of stable hydrogen isotope analysis in beef geographical origin traceability [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2009, 37(9): 1333-1336.